

(Aus der Universitäts-Augenklinik Basel [Direktor: Prof. Dr. A. Brückner].)

Untersuchungen über das Bewegungssehen bei Hell- und Dunkeladaptation

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der medizinischen Fakultät
der Universität Basel

vorgelegt von

Michaela Hodel-Boos

med. pract.

von Riehen und Basel

Basel 1948



VERLAG VON S. KARGER IN BASEL

Von der medizinischen Fakultät Basel genehmigt auf Antrag von Professor Dr. A. Brückner.

Tag der Promotion: 9. November 1946.



1. Einleitung.

Während der Zeit der Verdunkelung konnte man beobachten, daß man aus einer vermeintlich schon stehenden Straßenbahn ausstieg und dabei zu Fall kam, weil das Fahrzeug in Wirklichkeit noch eine ziemlich große Geschwindigkeit hatte.

Vor kurzem war in den Tageszeitungen zu lesen, daß jemand die Bundesbahnen verantwortlich machen wollte für einen Unfall, den er erlitten hatte, weil er in der Verdunkelung den noch fahrenden Zug schon stehend geglaubt und ihn daher zu früh verlassen hatte.

Es stellt sich nun die Frage, ob dieser Ausfall der Bewegungswahrnehmung allein die Folge der in der Dunkelheit allgemein herabgesetzten Sehschärfe, oder ob auch das nach der Dunkeladaptation in Funktion getretene Organ des Dämmerungssehens für Bewegungen weniger empfindlich sei.

Das Problem des Bewegungssehens ist außerordentlich kompliziert. Sinnesphysiologen und experimentelle Psychologen haben sich damit befaßt, während die Störungen der Bewegungsempfindung bzw. -wahrnehmung (*Helmholtz*) an Hirnkranken und Hirnverletzten von psychiatrischer Seite bearbeitet wurden.

Die Kompliziertheit des Problems veranlaßt folgende kurze Ausführungen, durch welche zuerst der ganze Komplex von Wahrnehmungen bzw. Empfindungen, den man unter den Begriff «Bewegungssinn» zusammenfassen könnte, kurz differenziert werden soll, um auch das Bewegungssehen sachgemäß einordnen zu können.

Zunächst sind die Bewegungen in der Außenwelt anzuführen, die wir vor allem durch das Auge wahrnehmen.

Die Wahrnehmung unserer eigenen aktiven Bewegungen dagegen — der willkürlichen wie der unwillkürlichen — verdanken

wir zum großen Teil denjenigen Funktionen, die man unter dem Begriff der Tiefensensibilität zusammenfaßt, zum kleineren Teil aber auch dem Auge.

Das *Formensehen* scheint dazwischen zu stehen, wenigstens in Fällen, wo eine unbekannte Form zum ersten Male gesehen wird, oder bei Hirnverletzten (*Goldstein und Gelb*): Indem das Auge den Formen folgt, nehmen wir mittels der Wahrnehmung des Bewegungsablaufes der Augen diese Formen wahr. *F. B. Hofmann* (S. 575) macht in einer Anmerkung auf die Möglichkeit der experimentellen Nachprüfung dieser Tatsache aufmerksam: «Man kann die Erscheinung, daß Personen optische Formen nur durch Nachfahren der Bewegungen des Auges erkennen, dadurch künstlich erzeugen, daß man die Bilder der seitlichen Netzhautteile bis auf ein ganz kleines zentrales Gebiet abbildet.»

Über eine dritte Art von Bewegungen, die passive Fortbewegung des eigenen Körpers durch technische Hilfsmittel, können wir auch nur durch das Auge genaueren Aufschluß erhalten, denn durch den im Innenohr lokalisierten Raumsinn werden nicht gleichmäßige Bewegungszustände, sondern nur Veränderungen von Bewegungszuständen (Beschleunigung und Verzögerung) percipiert. Die passive Fortbewegung mit großen Geschwindigkeiten können wir als unphysiologisch bezeichnen, denn sie ist erst seit dem Bau entsprechender Fahrzeuge in der Neuzeit möglich; so ist es auch nicht zu verwundern, daß wir für ihre Wahrnehmung kein eigenes Sinnesorgan besitzen und diesbezüglich ganz auf das Auge angewiesen sind. Wie sich dem Auge sonst die wirklichen Bewegungen der Außendinge mitteilen, so nimmt es jetzt ihre *relative* Bewegung wahr — während sie selbst in Wirklichkeit stillstehen —, und wir schließen dadurch auf unseren eigenen Bewegungszustand. Ist nun das Auge (z. B. durch Dunkelheit) ausgeschaltet, so fehlt uns jede genaue Orientierungsmöglichkeit über unseren passiven Bewegungszustand in einem Fahrzeug. Dies ist z. B. der Fall, wenn man im Begriff ist, nachts aus einem beleuchteten Tramwagen auszusteigen; man sieht mit dem unadaptierten Auge draußen keinerlei Einzelheiten, besonders, wenn von der Innenbeleuchtung nichts nach außen dringt, wie es bei der Verdunkelung vorkam.

II. Versuchsanordnung.

Es sollte, wie schon erwähnt, durch unsere Versuche ermittelt werden, welcher Unterschied besteht für die *Geschwindigkeitsschwelle* (vgl. S. 41) des Bewegungssehens bei Hell- und Dunkeladaptation. Dazu bedienten wir uns der im Folgenden beschriebenen Versuchsanordnung.

Eine senkrecht stehende Kymographiontrommel wird über einen Transmissionsriemen durch einen elektrischen Kymomotor von *Jaquet* angetrieben und dadurch in kontinuierliche Rotationsbewegung versetzt, deren Richtung beliebig gewechselt werden kann. Die Geschwindigkeit kann auf drei Arten verändert werden:

1. durch drei verschieden große Transmissionsräder,
2. durch fünf verschiedene Übersetzungen des Motors,
3. durch eine Friktionsbremse.

Auf der Trommel steht ein 21 cm hoher Glaszylinder, der mit schwarz-weiß gemustertem Papier in drei verschiedenen Dessins überzogen wird. Von oben hängt in den Glaszylinder eine Lampe mit einer gewöhnlichen Tageslichtbirne von 40 Watt hinein, deren Helligkeit durch drei vorgeschaltete Widerstände abgestuft werden kann. Die Versuche bei Helladaptation wurden fast mit der vollen Beleuchtungsstärke durchgeführt, die nur gerade so weit abgeschwächt wurde, daß keine unangenehmen Blendungsempfindungen eintraten. Bei den Versuchen im Dunkeln waren alle drei Widerstände (im ganzen 270 Ohm) eingeschaltet, so daß bei Dunkeladaptation das Muster auf dem Zylinder gerade noch einigermaßen deutlich wahrgenommen werden konnte, während es mit noch helladaptiertem Auge unsichtbar war. Bei dieser Beleuchtung sind auch keinerlei Farbenunterschiede mehr sichtbar, so daß man praktisch mit voller Dunkeladaptation rechnen kann. Im Versuchsraum befand sich während der Versuche keine andere Lichtquelle als das beleuchtete Objekt selbst.

Das *erste* der verwendeten *Muster* wird durch ein weißes Papier dargestellt, auf welchem je einen cm von einander entfernt senkrechte schwarze Papierstreifen aufgeklebt sind, so daß immer ein schwarzer Streifen von 1 cm Breite mit einem gleich breiten weißen (transparenten) Streifen abwechselt. Um das *zweite Muster* zu bekommen, wurde weißes Papier unregelmäßig mit schwarzer Tusche überklebt und durch Aufeinanderklatschen weiter verschmiert und verteilt. Es entstanden dabei unregelmäßige Figuren und Striche von verschiedener Schwärze, die besonders bei Dunkelheit ein phantastisches Aussehen annahmen. Dadurch sollte ein ähnlich zufälliger Eindruck hervorgerufen werden, wie ihn Geröll, Gras oder Kiesboden bei Dämmerung bieten können. Das *dritte Muster* ist wie das erste, aber die Breite der sich abwechselnden senkrechten schwarzen und weißen Streifen beträgt nur 0,5 cm.

Der Scheitel der überzogenen Zylinderkrümmung liegt 50—53 cm vor dem Auge der Versuchsperson, und diese betrachtet das Muster durch einen mit schwarzem Samt ausgeschlagenen rechteckigen Tubus, an dessen Ende sich ein 2 cm hoher und 10 cm breiter Beobachtungsspalt befindet, und zwar in 30 cm Entfernung vor dem Scheitel der Zylinderkrümmung. Die Versuche wurden also auf einem beschränkten Gesichtsfeld durchgeführt. Es fehlen dabei — wie auch im Dunkelmuseum — die Vergleichsgegenstände, von deren Bewegungszustand sonst die Stärke des Bewegungseindrucks mitbestimmt würde (*H. Aubert*, Bd. 39, S. 359; *H. Kleint*).

Der Kopf der Versuchsperson ist durch eine Kinnstütze weitgehend fixiert. Kleine Differenzen der Entfernung zwischen Objekt und Beobachteraue haben übrigens nach *Wallach* kaum einen Einfluß.

Bei den Versuchen im indirekten Sehen sind beidseits 1 cm seitlich vom vertikalen Rand des Beobachtungspaltes 2 punktförmige blaugrüne Fixierlichter angebracht, bei deren Fixation das Auge die Mitte des Spaltes unter einem Winkel von ca. $12,5^\circ$ indirekt beobachten kann. Ihre Helligkeit wurde je nach Beleuchtung des Musters so abgestuft, daß sie einerseits nicht hell genug waren, um die Beobachtung des Objektes zu stören, andererseits nicht so dunkel, daß ihre Fixation Mühe machte, weil man gegen Ablenkung auf ein viel heller erleuchtetes Objekt zu kämpfen hatte.

Für die Schwellenbestimmungen ideal wäre ein Apparat, dessen Geschwindigkeit kontinuierlich zu ändern ist, während bei dem von uns verwendeten Apparat nur eine stufenweise Änderung möglich war. Die Versuche spielten sich bei Geschwindigkeiten zwischen 0,031 cm/Sek. und 0,719 cm/Sek. ab, dazwischen waren 19 weitere Stufen möglich, die in den für die Schwellenbestimmung besonders wichtigen niedrigen Bereichen nahe beieinanderliegen. Die Geschwindigkeit auf den verschiedenen Stufen wurde errechnet aus dem Mittelwert von je drei Einzelbestimmungen mit der Stoppuhr, wobei jeweils bestimmt wurde, nach wieviel Sekunden 10 cm des Musters sich vorbeibewegt hatten.

Die *Jaquetsche* Motor arbeitet sehr exakt und kleine Abweichungen wären nur durch Schwankungen im Stromnetz möglich, die aber die Geschwindigkeiten nur um wenige Prozent ändern könnten und somit praktisch nicht berücksichtigt werden müssen.

Genauer wäre eine automatische Registrierung der Rotationsgeschwindigkeit mit nachheriger Ablesung. Die Einrichtung wäre unter den gegebenen Umständen viel zu kompliziert gewesen, und die Genauigkeit der angewendeten Methode genügte praktisch vollkommen.

III. Vorversuche.

Um die Methode besser auszuarbeiten und ein vorläufiges Resultat zu erhalten, wurden zunächst einige Vorversuche mit dem breiten Streifenmuster angestellt, und zwar mit verschiedenen Formen des davor gestellten Beobachtungspaltes.

Bei Fixation auf die Mitte des Sehspaltes bemerkte man folgendes: Bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit war der Bewegungseindruck unvergleichlich viel stärker bei hoher Beleuchtungsintensität als bei herabgesetzter Beleuchtung. Im zweiten Falle schienen die Streifen schon bei der verwendeten mittleren Geschwindigkeit von 0,22 cm/Sek. still zu stehen. Ab und zu konnte man dabei kleine Ruckbewegungen wahrnehmen. Dagegen *beurteilte* man, daß dennoch eine wirkliche Bewegung stattfand, wenn man auf einer Seite des relativ schmalen Spaltes einen hellen Streifen auftauchen sah. Auch unabhängig davon wurde wieder eine ziemlich kontinuierliche Bewegung bemerkbar, wenn

infolge der zunehmenden Dunkeladaptation die Helligkeit relativ größer wurde und damit durch die verbesserte Sehschärfe auch die einzelnen Streifen wieder als solche besser erkennbar wurden. Ging man dann mit der Beleuchtungsintensität noch weiter hinunter, so stellte sich dasselbe Phänomen des scheinbaren Stillstehens wieder ein; um dabei trotzdem einen Bewegungseindruck hervorzurufen, mußte die Rotationsgeschwindigkeit der Trommel jeweils weiter gesteigert werden.

Es dürfte übrigens schwierig sein, eine zahlenmäßige Antwort zu finden auf die Frage, um wie viel die Geschwindigkeit bewegter Objekte bei den verschiedenen Graden unvollkommener Dunkeladaptation subjektiv unterschätzt werde. Man müßte sich wahrscheinlich einer ähnlichen Versuchsanordnung bedienen, wie sie von *Cords* und *v. Brücke* beschrieben wurde.

Weiterhin zeigte sich in den Vorversuchen deutlich die Differenz des Bewegungssehens, die erfahrungsgemäß zwischen direktem und indirektem Sehen besteht: Indirekt war bei heller Beleuchtung und der gleichen Geschwindigkeit der Bewegungseindruck viel ausgeprägter als direkt. Bei Dunkeladaptation war entweder kein Unterschied oder vielleicht eher das Gegenteil zu beobachten.

Dieser Unterschied ist übrigens umstritten. Die Richtigkeit der *Exner*-schen Angabe (vgl. S. 39), daß die Bewegungsgröße im indirekten Sehen überschätzt werde, wurde später von *Basler* (*Pflügers Archiv*) bestritten. Jedenfalls scheint ein solcher Unterschied bezüglich der *Bewegungsgeschwindigkeit* und besonders für langsame, schwelennahe Bestimmungen noch weniger zu bestehen als für das *Ausmaß* einer Bewegung, wie aus den ermittelten Schwellenwerten (vgl. S. 38) entgegen manchen subjektiven Angaben (wenigstens bei einer Exzentrizität von 12,5°) hervorgeht.

In diesem Zusammenhange interessieren auch die Untersuchungen *Stigler's* «Vergleich der Wahrnehmungsfähigkeit für kleinste Bewegungen in der Peripherie des Gesichtsfeldes bei Weißen und bei Negern», welche bei zwei Ugandanegern 2,5—4,5mal größer war als bei Weißen.

Anhand der angestellten Vorversuche ergab sich das *Arbeitsprogramm*.

Zuerst sollte festgestellt werden, wie weit die Höhe, eventuell die Breite des Spaltes und somit die Anzahl der gleichzeitig sichtbaren Streifen von Einfluß sind auf den Bewegungseindruck, besonders da bei hohem Spalt auch bei zentraler Fixation das indirekte Sehen in Betracht kommen könnte.

Um festzustellen, wie weit eine Verbesserung des Bewegungssehens im Dunkeln durch die zunehmende Dunkeladaptation erreicht würde, sollte sodann in den Hauptversuchen die Schwelle des Bewegungssehens bei Hell-

und Dunkeladaptation im direkten und indirekten Sehen ermittelt werden. Es sollte sich auch zeigen, in welchem Sinne das Bewegungssehen von den verschiedenen Formen der dargebotenen Muster beeinflußt werde. Ferner war es von Interesse, ob die Bewegungsrichtung der Trommel auf das indirekte Bewegungssehen bei Fixation der Marke rechts bzw. links vom Spalt einen wesentlichen Einfluß habe.

Die Auswahl der Form und Größe des rechteckigen Beobachtungsspaltcs von 2 cm Höhe und 10 cm Breite erlaubte bei der gegebenen Versuchsanordnung eine wichtige Fehlerquelle auszuschalten, nämlich die *Beurteilung* durch das Auftreten seitlicher Streifen (s. S. 28).

Bei dem Ausprobieren der verschiedenen Spaltformen wurde durch eine Versuchsperson die interessante Beobachtung gemacht, daß ein schräg von oben nach unten verlaufender Sehsplatt das Fixieren fast verunmögliche.

Um nun das *Urteil* (vgl. S. 43) der Bewegung zugunsten des reinen Bewegungseindrucks auszuschalten, wurde der Sehsplatt auf 10 cm verbreitert, so daß in der angegebenen Entfernung zwischen Auge und Objekt eben die ganze Breite des mit dem Muster bespannten Zylinders sichtbar wird. Die auf der Seite befindlichen Teile des Musters erscheinen entsprechend der Zylinderform des Objektes verschmälert und verschwommen, und werden daher bei zentraler Fixation nicht beachtet. Außerdem wurde das Objekt bei den Hellversuchen nur 6 Sekunden lang beleuchtet, denn es hatte sich gezeigt, daß diese Zeitspanne zum Erkennen auch der kleinsten Bewegungen als solcher genügt, aber zu kurz ist, dem Beobachter aus einer «Situationsveränderung» ein Urteil über eine stattfindende Bewegung zu gestatten.

Bei den Versuchen im Dunkeln wurde das Objekt jeweils nur wenig länger beleuchtet: statt 6 Sekunden ca. 7 Sekunden, da es nach Einschalten der Beleuchtung erst nach einer Latenzzeit von ca. einer Sekunde zur Sichtbarkeit gelangte.

Durch die kurze Dauer der Einzelbeobachtungen wurde das frühe Auftreten von Ermüdungserscheinungen möglichst vermieden, die sich besonders durch Scheinbewegungen äußern (*Basler*, S. 316). Auch *Aubert* (S. 474) empfiehlt kurze Beobachtungszeiten, vor allem um autokinetische Scheinbewegungen auszuschließen, «die sich im Dunkeln mit großer Energie einstellen».

Für das zentrale Sehen wurde kein Fixierzeichen angebracht, sondern die Versuchspersonen einfach angewiesen, möglichst konstant die Mitte des Sehsplattes zu fixieren. Ein Fixierzeichen hätte zwar eher verhindern können, daß die seitlichen Spaltränder beachtet würden, dafür wäre aber der für die seitlichen Partien ausgeschaltete Fehler nun bezüglich der Spaltmitte wieder um so größer geworden.

Zwischen monokularer und binokularer Beobachtung zeigte sich in den Resultaten der Vorversuche kein Unterschied, dagegen waren beim binokularen Sehen störende Doppelbilder des Sehsplattes vorhanden. Alle späteren Versuche wurden daher monokular durchgeführt, und zwar mit dem führenden bzw. mit dem besseren Auge der Versuchsperson, bei 9 Personen mit dem rechten, bei einer mit dem linken Auge. Daß die monokulare Bewegungswahrnehmung bei abgeschirmtem Gesichtsfeld nicht von der binokularen verschieden ist, zeigte schon *Aubert* (S. 359).

IV. Hauptversuche.

Die Versuche wurden mit 10 Personen durchgeführt; die meisten waren gesunde Mitarbeiter beiderlei Geschlechts, verschiedenen Alters der Basler Augenklinik sowie einige Bekannte und Kollegen, die sich freundlicherweise zur Verfügung gestellt hatten und denen an dieser Stelle für ihre Bereitwilligkeit bestens gedankt sei, 3 sind korrigierte Myope mäßigen Grades, 1 hyperop, 1 presbyop, die alle bei den Versuchen keinen Unterschied gegenüber Rechtsichtigen zeigten.

Wichtiger als Refraktionsunterschiede scheint dagegen das individuell stark wechselnde Adaptationsvermögen (*G. Matthey*) für den Ausfall der Versuche zu sein. Auf die Anfertigung von Adaptationskurven der verschiedenen Versuchspersonen mußte leider verzichtet werden, da es nicht anging, ihre Zeit noch mehr in Anspruch zu nehmen.

Jedes Mal vor Beginn der Dunkelversuche hielten sich die Versuchspersonen 15 Minuten im vollständig verdunkelten Versuchsraume auf. Trotzdem konnte es vorkommen, daß im Verlauf einer Versuchsreihe besonders gegen den Schluß hin sich die Resultate noch wesentlich verbesserten. In einzelnen Fällen wurde schließlich sogar derselbe Schwellenwert wie am hell erleuchteten Objekt erreicht, und zwar trotz einer gewissen Ermüdung, die eine Versuchsreihe von $\frac{1}{2}$ —1stündiger Dauer hervorrufft.

Auch im Hellen verbesserten sich die Resultate im Verlaufe der Versuchsreihe, aber lange nicht so ausgesprochen. Aus diesem Grunde wurde eine Versuchsreihe immer mit den höheren Geschwindigkeitsstufen begonnen und zu immer kleineren Geschwindigkeiten heruntergegangen.

Mit jeder Versuchsperson wurden 4 Versuchsreihen angestellt:

1. Schwellenbestimmungen im direkten Sehen bei Hell- und Dunkeladaptation mit dem breitgestreiften Muster 1,
2. dasselbe mit dem unregelmäßigen Muster 2.

Die 3. Versuchsreihe bestand in Schwellenbestimmungen mit dem schmalen Streifenmuster im direkten sowie im indirekten Sehen bei Helladaptation,

die 4. Reihe schließlich in denselben Versuchen wie die dritte, aber bei Dunkeladaptation.

Die *einzelne Versuchsreihe* spielte sich folgendermaßen ab: Mit jeder Rotationsgeschwindigkeit wurden 4 Einzelversuche gemacht, d. h., das Muster wurde bei der betreffenden Geschwindigkeitsstufe je 4mal 6 bzw. 7 Sekunden lang beleuchtet. Die Richtung wurde oft gewechselt, verschiedene Geschwindigkeiten durcheinander gezeigt, sowie zahlreiche Vexierversuche eingeschaltet, so daß für die Versuchsperson kein geregelter Ablauf erkennbar war. Sie hatte jedes Mal, wenn die Lampe wieder ausgeschaltet wurde, ihren unmittelbaren Eindruck vom Bewegungszustande des Objektes in der vorangegangenen Expositionszeit mitzuteilen, d. h. zu sagen: Bewegung nach rechts, links, Stillstehen, unsicher usw. Jede richtige Angabe wurde mit +, jeder falsch gerichtete oder unsichere Eindruck mit (+) bezeichnet. Wurde keine Bewegung gesehen, so wurde dies mit — vermerkt. Fand sich dann unter

den 4 Einzelbeobachtungen einer bestimmten Geschwindigkeit nur ein einziges oder gar kein +, so wurde angenommen, der Schwellenwert sei erreicht, bzw. schon unterschritten.

Zwischen den einzelnen Expositionen wurde jeweils so lange gewartet, bis eventuell vorhandene Nachbilder sich nicht mehr störend bemerkbar machten. Für jeden Einzelversuch bei exzentrischer Beobachtung wurde das Kommando, welche Seite zu fixieren sei, so lange vor der Erleuchtung des Objektes gegeben, als es nötig war, um Scheinbewegungen durch die Einstellungsbewegung zu vermeiden.

Die Streuung der erhaltenen Schwellenwerte wurde nicht berechnet; es hätte dies keinen Sinn gehabt, da für jede Geschwindigkeit nur 4 Einzelversuche gemacht werden konnten. Eine größere Anzahl von Versuchen innerhalb einer Versuchsreihe hätte diese viel zu sehr verlängert und dadurch der Ermüdung, die ihrerseits eine der größten Fehlerquellen war, Vorschub geleistet. Als Ersatz für eine Berechnung der Streuung wurde in den Tabellen die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Schwellenwert (Zone der Unsicherheit) für die einzelnen Versuchspersonen aufgeführt.

V. Ergebnisse.

1. *Versuche im direkten Sehen mit Muster 1* (abwechselnde 1 cm breite weiße und schwarze vertikale Streifen (s. Tabelle I).

9 Versuchspersonen zeigten einen deutlichen Unterschied der Geschwindigkeitsschwelle für das Bewegungssehen zwischen Hell- und Dunkeladaptation. Frau Dr. St. zeigte diesen Unterschied nur angedeutet.

Das Verhältnis der Mittelwerte der eben noch wahrgenommenen Geschwindigkeiten beträgt 0,055 cm/Sek. bei Hell- zu 0,177 cm/Sek. bei Dunkeladaptation. Die Geschwindigkeit im Dunkeln muß also 3,24 mal größer sein als bei Helligkeit.

Bei Helladaptation betrug die höchste Schwelle 0,094 cm/Sek. (Frl. O.), die niedrigste 0,031 cm/Sek. (Frau S. u. a.), bei Dunkeladaptation 0,368 cm/Sek. (Frl. O.) und 0,055 cm/Sek. (Frau Dr. St.). Dazu ist bei Dunkeladaptation die Beurteilung wesentlich unsicherer als bei Helladaptation; das zeigt sich darin, daß bei Dunkeladaptation ein viel breiterer Schwellenbereich vorhanden ist. Unter *Schwellenbereich* oder *Zone der Unsicherheit* verstehen wir diejenigen Geschwindigkeiten, die zwischen der absoluten Schwelle und der größten Geschwindigkeit, bei der noch falsche Angaben gemacht wurden (relative Schwelle), liegen. Die mittlere Differenz dieser beiden Werte beträgt bei Helladaptation 0,0059 cm/Sek., bei Dunkeladaptation 0,0488 cm/Sek., ist also bei dieser 8,27 mal größer als bei jener.

(Nebenerscheinungen siehe S. 35.)

TABELLE I.

Muster 1: Breite Streifen (1,0 cm).

Helladaptation.

Versuchs- personen	Alter	Refraktion des beobachtenden Auges (korrigiert)	absolute Schwelle cm/Sek.	relative Schwelle	Differenz (Unsicherheits- zone)	Mittel- werte
Frl. O.	23	R. emmetrop	0,094	0,094	0	0,094
Hr. I.	25	R. —4,5	0,055	0,094	0,039	0,074
Fr. B.	46	R. emmetrop	0,057	0,057	0	0,057
Hr. Dr. S.	39	R. emmetrop	0,046	0,055	0,009	0,050
Hr. P.	25	L. —4	0,031	0,031	0	0,031
Hr. H.	25	R. emmetrop	0,031	0,031	0	0,031
Frl. P.	54	R. presbyop	0,069	0,069	0	0,069
Frl. Dr. H.	32	R. 3,75 cyl—3,0 Axe 0°	0,057	0,057	0	0,057
Fr. S.	24	R. emmetrop	0,031	0,031	0	0,031
Fr. Dr. St.	30	R. cyl+0,5 Axe 90°	0,046	0,057	0,011	0,051
Durchschnittswerte					0,006	0,055
Größter Wert (Frl. O.)			0,094			
Kleinsten Wert			0,031			

Dunkeladaptation.

Frl. O.	0,290	0,368	0,078	0,329
Hr. I.	0,239	0,239	0	0,239
Fr. B.	0,222	0,222	0	0,222
Hr. Dr. S.	0,137	0,137	0	0,137
Hr. P.	0,184	0,184	0	0,184
Hr. H.	0,137	0,239	0,102	0,188
Frl. P.	0,120	0,239	0,119	0,179
Frl. Dr. H.	0,072	0,094	0,022	0,083
Fr. S.	0,072	0,222	0,150	0,147
Fr. Dr. St.	0,055	0,072	0,017	0,063
Durchschnittswerte			0,049	0,177
Größter Wert (Frl. O.)			0,368	
Kleinsten Wert (Fr. Dr. St.)			0,055	

Verhältnis der durchschnittlichen Mittelwerte (Hell:Dunkel) 1:3,24.

Verhältnis der durchschnittlichen Differenzen (Hell:Dunkel) 1:8,27.

Anmerkung: Die Angaben in der 3. Dezimalen sind nur durch Ausrechnung der Mittelwerte entstanden und nur von beschränkter Gültigkeit.

2. Versuche im direkten Sehen mit Muster 3 (abwechselnde 0,5 cm breite weiße und schwarze vertikale Streifen) (s. Tabelle II).

Bei 7 Versuchspersonen waren ganz deutliche Schwellenunterschiede zwischen Hell- und Dunkeladaptation zu beobachten, bei Herrn P., Fr. S. und Fr. Dr. St. waren diese nur gering.

TABELLE II.

Muster 3: Schmale Streifen (0,5 cm).

Helladaptation.

Versuchs- personen	absolute Schwelle cm/Sek.	relative Schwelle	Differenz (Unsicherheits- zone)	Mittel- werte
Frl. O.	0,031	0,055	0,024	0,043
Hr. I.	0,031	0,069	0,038	0,050
Fr. B.	0,046	0,046	0	0,046
Hr. Dr. S.	0,046	0,046	0	0,046
Hr. P.	0,031	0,069	0,038	0,050
Hr. H.	0,046	0,057	0,011	0,051
Frl. P.	0,046	0,046	0	0,046
Frl. Dr. H.	0,031	0,046	0,015	0,038
Fr. S.	0,031	0,031	0	0,031
Fr. Dr. St.	0,031	0,031	0	0,031
Durchschnittswerte			0,013	0,043
Größter Wert (Hr. I. und Hr. P.)		0,069		
Kleinster Wert		0,031		

Dunkeladaptation.

Frl. O.	0,072	0,184	0,112	0,128
Hr. I.	0,072	0,072	0	0,072
Fr. B.	0,069	0,069	0	0,069
Hr. Dr. S.	0,069	0,222	0,153	0,1455
Hr. P.	0,031	0,239	0,208	0,135
Hr. H.	0,184	0,239	0,055	0,2115
Frl. P.	0,137	0,137	0	0,137
Frl. Dr. H.	0,137	0,137	0	0,137
Fr. S.	0,031	0,120	0,089	0,0755
Fr. Dr. St.	0,036	0,057	0,021	0,0465
Durchschnittswerte			0,064	0,116
Größter Wert (Hr. H. und Hr. P.)		0,239		
Kleinster Wert (Fr. S.)		0,031		

Verhältnis der durchschnittlichen Mittelwerte (Hell:Dunkel) 1:2,67.

Verhältnis der durchschnittlichen Differenzen (Hell:Dunkel) 1:5,06.

Die Schwelle lag gegenüber Muster 1 durchschnittlich etwas niedriger für Helladaptation (0,0433 gegen 0,05465 cm/Sek.), deutlich niedriger für Dunkeladaptation (0,1157 gegen 0,1772 cm/Sek.). Nach *Cords* und *v. Brücke* kommt es durch die Verschmälerung der Streifen 1. zu einer Zunahme der Reizzahl in der Zeiteinheit, 2. zur Distanzverringernng zwischen den gleichzeitig gereizten Netzhautabschnitten, 3. zu einer Zunahme der Zahl der gleichzeitig sichtbaren bewegten Konturen.

Die Sicherheit der Beurteilung war eher größer als bei Muster 1, hatte jedenfalls nicht abgenommen. Die Zone der Unsicherheit war bei Dunkeladaptation wiederum viel breiter als im Hellen, dagegen erreichten auch bei Dunkeladaptation zwei Versuchspersonen (Fr. S. und Hr. P.) dieselben niedrigen Schwellenwerte wie im Hellen.

Die beobachteten *Nebenerscheinungen* waren dieselben wie bei Muster 1, nur schienen sie hier bei dem schmal gestreiften Muster noch ausgeprägter zu sein, so besonders ein gewisses sich bis zu Nausea steigernes Schwindelgefühl beim Anblick der sich drehenden Trommel. Es stellte sich nur bei einzelnen Personen und vor allem im Dunkeln ein; dabei schien die stark vermehrte Anstrengung und raschere Ermüdbarkeit in der Dunkelheit mitzuwirken.

Im Hellen kam es zu starken Nachbildern, oft mit farbigen Streifen (Blendung), die sich gelegentlich bewegten, und zwar meist im entgegengesetzten Sinne als das Vorbild, (Bewegungsnachbild, s. hierzu A. Brückner).

Am Anfang der Exposition entstand meist der Eindruck einer ruckartigen Bewegung, deren Richtung von der Einstellbewegung der Augen, die in der Dunkelpause leicht abgewichen waren, bestimmt war.

Sobald man sich den Geschwindigkeiten des Schwellenbereiches näherte, kamen ruckartige oder zitternde Bewegungen der Streifen zur Beobachtung, aus denen gelegentlich noch die wirkliche Bewegungsrichtung erschlossen werden konnte, wenn sich eine Richtungsphase stärker ausgeprägt zeigte. Im Hellen schien der Sehspalt oft zu Beginn der Exposition wesentlich nach oben und unten zu wachsen.

Bei Dunkeladaptation wurden im Schwellenbereich mehr wogende und flimmernde Bewegungen gesehen, welche der wirklichen Bewegungsrichtung genau entsprachen, aber *vor* dem Muster (dessen Streifen festzustehen schienen) vorbeizogen (vgl. S. 44 u. S. 45). Alle diese Bewegungseindrücke wurden, so bald sie der Drehrichtung entsprachen, im Protokoll positiv ausgewertet.

In allen Versuchsreihen konnte man oft beobachten, daß, wenn nach unterschwelligem Reizen die Trommel einmal wirklich stillstehend exponiert wurde, nun eine Bewegung gesehen wurde, welche der vorausgegangenen unbemerkt gebliebenen wirklichen Bewegung entgegengesetzt gerichtet war. Man könnte daraus entnehmen, daß die Schwelle für das Zustandekommen eines Bewegungsnachbildes eventuell noch niedriger liegt als für die Erzeugung eines Bewegungseindrucks. Ob dies wirklich zutrifft, soll hier nicht entschieden werden (s. A. Brückner).

3. *Versuche im direkten Sehen mit Muster 2* (unregelmäßige schwarze Figuren aus Tusche auf weißem Grund) (s. Tabelle III).

9 Versuchspersonen zeigten ebenfalls deutliche Unterschiede der Schwellenwerte für Hell- und Dunkeladaptation; bei Frau B. hingegen ist der Unterschied nur klein.

Die Schwelle für Helladaptation liegt eher noch etwas niedriger als bei Muster 1, für Dunkeladaptation wenig höher.

TABELLE III.

Muster 2: unregelmäßiges Muster.

Helladaptation.

Versuchs- personen	absolute Schwelle cm/Sek.	relative Schwelle	Differenz (Unsicherheits- zone)	Mittel- werte
Frl. O.	0,046	0,057	0,021	0,051
Hr. I.	0,036	0,036	0	0,036
Fr. B.	0,055	0,055	0	0,055
Hr. Dr. S.	0,072	0,072	0	0,072
Hr. P.	0,031	0,031	0	0,031
Hr. H.	0,057	0,057	0	0,057
Frl. P.	0,031	0,069	0,038	0,050
Frl. Dr. H.	0,031	0,031	0	0,031
Fr. S.	0,031	0,031	0	0,031
Fr. Dr. St.	0,031	0,031	0	0,031
Durchschnittswerte			0,006	0,046
Größter Wert (Hr. Dr. S.)		0,072		
Kleinster Wert		0,031		

Dunkeladaptation.

Frl. O.	0,094	0,094	0	0,094
Hr. I.	0,120	0,366	0,246	0,243
Fr. B.	0,046	0,092	0,046	0,069
Hr. Dr. S.	0,094	0,184	0,090	0,139
Hr. P.	0,222	0,719	0,497	0,470
Hr. H.	0,184	0,239	0,055	0,211
Frl. P.	0,239	0,368	0,129	0,303
Frl. Dr. H.	0,055	0,092	0,037	0,073
Fr. S.	0,368	0,368	0	0,368
Fr. Dr. St.	0,069	0,094	0,025	0,071
Durchschnittswerte			0,112	0,204
Größter Wert (Hr. P.)		0,719		
Kleinster Wert (Frl. Dr. H.)		0,055		

Verhältnis der durchschnittlichen Mittelwerte (Hell:Dunkel) 1: 4,54.

Verhältnis der durchschnittlichen Differenzen (Hell:Dunkel) 1:19,07.

Auffallend dagegen ist die enorme Unsicherheit der Beurteilung bei Dunkeladaptation, während sie im Hellen gegenüber den Versuchen mit Muster 1 nicht verändert ist. Im Dunkeln zeigten besonders Herr I. und Herr P. einen sehr breiten Schwellenbereich. Alle Angaben der Versuchspersonen differierten stark.

Frau S. hatte einen sehr hochliegenden absoluten Schwellenwert bei Dunkeladaptation (0,368 cm/Sek.) und sah im Dunkeln auf dem Muster allerlei phantastische Ungeheuer, welche sich aufbliesen, zusammenschrumpften, sich

sonst verwandelten, ohne daß sie selbst indessen in irgendeiner Richtung fortbewegt erschienen. Andere sahen Tanzen und Flimmern, gleichzeitige entgegengesetzte Bewegungen einzelner Figuren, Helligkeitswechsel, Farbkugeln (vgl. S. 43 u. S. 45).

Die Meisten gaben an, das Urteil sei stark erschwert, weil das Auge sich unwillkürlich auf signifikante oder scharf gezeichnete Figuren einstelle; mit der Einstellbewegung entstanden natürlich allerhand Scheinbewegungen.

Frl. O. fand diese Versuche viel weniger schwierig als mit dem Streifenmuster: Sie seien kurzweiliger und weniger ermüdend.

4. *Versuche im indirekten Sehen* bei einer Exzentrizität von 12,5° temporal und nasal der Fovea, mit Muster 3 (s. Tabelle IV).

Es wurden, gemischt in einer Versuchsreihe mit folgenden 4 möglichen Bedingungen Versuche angestellt:

- | | | | | | |
|------|----------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| I. | Fixation | nach rechts | bei Rotation | der Trommel | nach links. |
| II. | » | » | links | » | » |
| III. | » | » | rechts | » | rechts. |
| IV. | » | » | links | » | links. |

Die Ergebnisse sind in ihren Durchschnittswerten in der folgenden Tabelle IV zusammengestellt.

Man ersieht daraus, daß die Schwelle bei Helladaptation nur wenig niedriger lag und etwas sicherer angegeben wurde (kleinere mittlere Differenz oder Unsicherheitszone), wenn gleichsinnig mit der Rotation der Trommel fixiert wurde, d. h. bei Rotation nach rechts auf die rechte Seite des Spaltes, bei Rotation nach links auf die linke Seite des Spaltes. Dies aus den sehr kleinen Unterschieden der Durchschnittswerte der Tabelle zu schließen, erscheint gewagt; wir glauben aber dennoch, daß es zulässig ist, da es auch den subjektiven Angaben der meisten Versuchspersonen entspricht, welche Bewegungen in Richtung auf den Fixierpunkt zu als entschieden leichter erkennbar empfanden, als entgegengesetzt gerichtete. Es gilt dies jedoch nicht bei Dunkeladaptation; wahrscheinlich deswegen, weil dabei überhaupt nicht so exakt beobachtet werden kann wegen der im Dunkeln viel größeren Bedeutung der Fehlerquellen (vgl. S. 39 f.).

In einzelnen Fällen wurde auch angegeben, daß die Bewegung beim Fixieren nach rechts sicherer zu beurteilen sei, als bei Linksfixation, was jedoch durch die Tabelle nicht bestätigt wird. Es könnte damit zusammenhängen, daß die meisten Versuchspersonen (9) mit ihrem rechten Auge beobachteten. Im übrigen ist prinzipiell zu sagen, daß für solche sinnesphysiologische Feinheiten die Schwellenbestimmung zwar bisher unsere einzige exakte Methode ist, die aber über die gesetzmäßige Begründung subjektiver Aussagen nicht entscheiden darf.

TABELLE IV.

Muster 3: Schmale Streifen (0,5 cm).

*Indirektes Sehen.**Helladaptation.*

	Mittel- werte cm/Sek.	Mittlere Differenz (Unsicher- heitszone)	Größter Wert	Kleinster Wert
I	0,055	0,013	0,094	0,031
II	0,058	0,017	0,094	0,031
III	0,039	0,001	0,069	0,031
IV	0,042	0,006	0,069	0,031
Durchschnitt für indirektes Sehen	0,049	0,009	0,081	0,031
Durchschnitt für direktes Sehen	0,043	0,013	0,069	0,031

Dunkeladaptation.

I	0,156	0,074	0,277	0,031
II	0,129	0,049	0,239	0,036
III	0,120	0,059	0,239	0,031
IV	0,144	0,072	0,239	0,031
Durchschnitt für indirektes Sehen	0,137	0,063	0,248	0,032
Durchschnitt für direktes Sehen	0,116	0,064	0,239	0,031

Verhältnis der Mittelwerte Helladaptation:Dunkeladaptation.

I	1 : 2,83
II	1 : 2,18
III	1 : 3,06
IV	1 : 3,39

Durchschnittliches Verhältnis der Mittelwerte für indirektes Sehen 1:2,86.

Durchschnittliches Verhältnis der Mittelwerte für direktes Sehen 1:2,67.

Das indirekte Beobachten rief allgemein rasche Ermüdung hervor.

Der Bewegungseindruck bei indirekter Beobachtung war oft nur am Anfang der Exposition vorhanden. Wurde nach Bewegungsreizen im Schwellenbereich die Rotationsrichtung der Trommel gewechselt, so trat oft eine überraschende Besserung der Angaben auf. Dies konnte man in einer Versuchsreihe mit sukzessiver Herabsetzung der Rotationsgeschwindigkeit oft mehrmals wiederholen.

Frl. P. sagte, daß sie, ohne eine eigentliche Bewegung zu sehen, im Schwellenbereich ein Anwachsen der Streifen in der Bewegungsrichtung bemerkte, woraus sie auf den wirklichen Bewegungszustand schließen konnte.

Bei der indirekten Beobachtung traten auch wieder ähnliche Nebenerscheinungen auf, wie die oben für das direkte Sehen beschriebenen. So wurden bei anscheinend stillstehenden Streifen Bewegungen über diese hinweglaufend gesehen (vgl. S. 43 u. S. 45), meist in der wirklichen Bewegungsrichtung: «wie laufende Ameisen», und zwar wieder vor allem im Dunkeln.

Die Zitterbewegungen bei Schwellenwerten traten auch im indirekten Sehen auf. Vielleicht sind sie auch durch Nystagmus bedingt (vgl. S. 35).

Die Tabelle IV liefert auch einen Vergleich zwischen direktem und indirektem Sehen. Im direkten Sehen liegt die Schwelle durchschnittlich etwas niedriger, die Sicherheit der Beurteilung ist besonders im Dunkeln größer. Für die Helladaptation liegen beim Fixieren nach der Seite der Bewegungsrichtung der Trommel die Werte sogar noch etwas niedriger als für die direkte Beobachtung.

Jedenfalls ist der Unterschied zwischen direktem und indirektem Sehen der Bewegungen bei unserer Versuchsanordnung — d. h. bei Exzentrizität von $12,5^\circ$ — wenn überhaupt vorhanden, sehr unbedeutend. Das schließt natürlich nicht aus, daß er im täglichen Leben nicht dennoch beträchtlich und wichtig sei, besteht er doch nach *Exner* vor allem darin, daß indirekt die Bewegungen *bemerkt* werden; zur *weiteren Beobachtung* «wenden wir dann unseren Blick unwillkürlich nach dem Ort dieser Bewegung. Es wird also niemals beobachtet mit der Netzhautperipherie, sondern nur bemerkt» — nämlich unter natürlichen Bedingungen (vgl. S. 29 u. S. 45).

VI. Auswertung und Zusammenfassung.

Die untere Schwelle für das Bewegungssehen ist bei Dunkeladaptation durchschnittlich 3,5 mal höher als bei Helladaptation. Dabei hängt dieses Verhältnis wesentlich von Form und Oberfläche der bewegt gesehenen Gegenstände ab, wie die Versuche mit Muster 2 zeigen. Danach wird unter weniger eng begrenzten Verhältnissen, draußen im Freien z. B., die Schwelle für Dunkeladaptation wohl bei noch höheren Geschwindigkeiten liegen.

Der Schwellenunterschied zwischen direktem und indirektem Sehen bei $12,5^\circ$ Exzentrizität ist klein; auch beim indirekten Sehen beträgt das Verhältnis der Schwellenwerte bei Hell- und Dunkeladaptation rund 1 : 3.

Allgemein kann man sagen, daß die Unsicherheit des Bewegungssehens bei Dunkeladaptation wesentlich (3—20 mal) größer ist als im Hellen, was sich durch die starke Streuung der Schwellenwerte äußert (s. Tabellen). Die einzelnen Grade der Unsicherheit hängen wiederum von den gegebenen Bedingungen ab:

Im Dunkeln sind die *Bedingungen für Fehlbeobachtungen* sehr günstig. Es kommt im Dunkeln rasch zu Ermüdung, wobei

Scheinbewegungen vermehrt auftreten (*Hofmann*, S. 547), diese sind im indirekten Sehen noch aufdringlicher (ebenda S. 587). «Scheinbewegungen schwach beleuchteter Objekte im dunkeln Raum» bemerkte erstmals *Charpentier*. Es handelt sich dabei um kontinuierliche Illusionen, die Bewegung in einer bestimmten Richtung vortäuschen im direkten und indirekten Sehen, die aber erst nach mehr oder weniger langer Fixationszeit und besonders bei Ermüdung auftreten» (*Aubert*, S. 623). Nach den mitgeteilten Beobachtungen traten solche Scheinbewegungen ganz besonders auf, so lange die Dunkeladaptation noch nicht vollständig war.

Nach *Fleischl* folgt das Auge in einem Gesichtsfeld ohne ruhende Objekte den Bewegungen eines Objektes mit dem Blick. Im Dunkeln bleiben diese Bewegungen oft unbewußt und führen so zu Täuschungen über den wahrgenommenen Bewegungszustand (*Aubert*, S. 673), da die Schwelle für das Erkennen von Bewegungen bei stillstehendem Auge niedriger ist als bei Verfolgung des bewegten Gegenstandes mit dem Blick (*Carr*).

Auch unterschwellige Drehreize, die als solche nicht erkannt werden, werden doch an der Scheinbewegung mitgedrehter Lichtsignale im Dunkeln wahrgenommen (*Christian*). Dieses Phänomen könnte u. U. auch zu Fehlern bei der Beobachtung von Bewegungen führen. Ebenso ist es bei Bewegungsnachbildern, für welche nach *v. Szily* «das ermüdete wie das dunkeladaptierte Auge in erhöhtem Maße suszeptibel ist.» Die Geschwindigkeit der Bewegungsnachbilder ist übrigens im indirekten Sehen viel größer als im direkten (*Cords* und *v. Brücke*).

Es gibt auch psychische Einflüsse auf das Bewegungssehen, so z. B. die Möglichkeit, durch veränderte geistige Einstellung eine Bewegungsrichtung in eine andere umzuwandeln, z. B. die Inversion der Bewegungsrichtung entfernter Windmühlenflügel (*Hofmann*, S. 579).

Die individuellen Unterschiede für das Bewegungssehen sind beträchtlich, dabei spielen zweifellos auch individuelle Differenzen des Adaptationsvermögens eine Rolle.

Die Beantwortung der ursprünglichen Fragestellung geht also dahin, daß die untere Schwelle der Geschwindigkeit für das Bewegungssehen bei Dunkeladaptation nicht so viel höher liegt als bei Helladaptation wie erwartet (ca. 3 : 1). Dagegen ist die Sicherheit der Beurteilung wesentlich geringer. Die Schwelle liegt aber sehr hoch, so lange das Auge noch nicht genügend dunkeladaptiert

tiert ist. Das stimmt überein mit den Angaben von *Aubert* (S. 359), *Kleint*, *Basler* (S. 426), daß im beschränkten Gesichtsfelde ohne sichtbare feste Vergleichsgegenstände die Geschwindigkeit um das 10—15fache größer sein muß als bei Helladaptation, damit die Bewegung noch bemerkt wird.

Zu *praktischer Bedeutung* gelangen diese Verhältnisse im Moment des Aussteigens aus hell erleuchteten Fahrzeugen in die dunklere Umgebung, und zwar besonders dann, wenn die Straßen- bzw. Bahnhofsbeleuchtung (wie z. B. in der Zeit der Verdunkelung) mangelhaft ist. Sobald sich unter solchen Bedingungen die Unfälle häufen würden, müßten automatische Vorrichtungen, durch welche die Wagentüren sich erst bei vollständigem Anhalten öffneten, gefordert werden, wie sie heute schon z. B. bei den neuen Wagen der städtischen Straßenbahn Zürich zu finden sind.

Versuche über Bewegungssehen im Dunkeln wurden u. a. von *Basler* mitgeteilt. Es handelt sich aber dabei um Beobachtung leuchtender Punkte, welche im Dunkeln ausgeführt wurde, um die stillstehenden Vergleichsgegenstände auszuschalten (vgl. oben u. S. 44 f.) und nicht um Bewegungssehen bei *Dunkeladaptation*.

Laurens untersuchte die *Sehschärfe* für Bewegungen, also die Schwelle des *Bewegungsmaßes*, welche je nach der Geschwindigkeit wechselt, für das dunkeladaptierte Auge und fand dabei «keinen sehr auffälligen Unterschied bezüglich der geprüften Verhältnisse zwischen Tages- und Dämmerungssehen»; während unsere Aufgabe darin bestand, diesen Unterschied bezüglich der *Geschwindigkeitsschwelle* zu ermitteln.

VII. Allgemeines über das Sehen von Bewegung.

Anläßlich von Versuchen über das Bewegungssehen erscheint eine kurze Analyse über die Natur des Versuchsobjektes wohl gerechtfertigt. Sie wurde nicht zuletzt veranlaßt durch Gedanken über die oben (S. 35, S. 36 f., S. 38 f.) erwähnten Nebenerscheinungen, die im Laufe der Versuche beobachtet werden konnten. Was ist Bewegungssehen? Sicher eine sehr komplexe Funktion, die von sinnesphysiologischer wie von psychologischer Seite bearbeitet worden ist. Alle Arbeiten anzuführen würde weit über den Rahmen dieser Abhandlung hinausgehen¹. Nur einiges Prinzipielle soll berührt werden.

Es war *Exner*, der zum ersten Male darauf hingewiesen hat,

¹ In diesem Zusammenhang ist auf die Ausführungen *Wertheimers* zu verweisen, die auch eine Aufzählung der hauptsächlichsten Theorien über das Bewegungssehen enthalten.

daß das Bewegungssehen eine eigene Empfindungsqualität sei, welche anderen Sinnesqualitäten, wie der Farbenempfindung, der Wärmeempfindung usw. durchaus gleich zu stellen ist².

So gilt auch die Bemerkung von *Hofmann* (S. 562), es sei die Grundbedingung des Bewegungssehens, daß man die sich folgenden Phasenbilder auf dasselbe Objekt beziehe, nur für sehr langsame Bewegungen, die man nicht unmittelbar empfinden, sondern nur erschließen kann, sowie für die stroboskopischen und kinematographischen Scheinbewegungen. Auf die Bewegungsempfindung dagegen angewandt, wäre sie ganz sinnlos, denn die spezifische Bewegungsempfindung ist eben dadurch charakterisiert, daß sie nicht in einzelne Phasen zerteilt ist, sondern gleichsam als einheitliches *Urphänomen* (*Goethe*) auftritt.

Der Bewegungseindruck ist durch die Bezeichnung als Empfindungsqualität zwar keineswegs kausal erklärt, aber doch als unabhängig vom reinen Gegenstandssehen bestehendes Urphänomen in einer Weise charakterisiert, die der Wirklichkeit sicher näherkommt, als Versuche einer Erklärung durch Phasenzusammensetzung, welche man auch «atomistisch» nennen könnte.

Auch gewisse psychologische Theorien über das Bewegungssehen, wie die von *Stern*, *Linke* u. a. basieren im Grunde genommen auf solch «atomistischen» Voraussetzungen, indem sie den Bewegungseindruck auch wieder durch Verschmelzung einzelner Wahrnehmungsphasen erklären wollen.

Bei der Stroboskopie und der Kinematographie ist der Wahrnehmungsvorgang der Scheinbewegung *wirklich* aus vielen rasch aufeinander folgenden Einzeleindrücken zusammengesetzt. Wenn man nun diese Erfahrung theoretisch ausbaut und damit zu einer «atomistischen Erklärung» auch des realen Bewegungssehens gelangen will, so ergibt sich folgendes Resultat: Das Bewegungssehen ist aus vielen kleinen aufeinanderfolgenden Reizen zusammengesetzt, welche infolge der Trägheit unseres Sehorgans zu einer Ganzheit verschmelzen. Somit ist das Bewegungssehen nur ein Spezialfall derjenigen Sinnestäuschung, die als Scheinbewegung auftritt, wobei das Stroboskop oder der Kinoapparat nun in unseren eigenen Organismus hineinlokalisiert ist. Ob man sich

² Die Begriffe «Empfindung» und «Wahrnehmung» werden bei *Exner* im Sinne von *Helmholtz* verwendet: Wenn der Bewegungseindruck unmittelbar, gleichsam als Urqualität auftritt, so wird er als Empfindung angesprochen, wenn Bewegung nur erschlossen wird, als Wahrnehmung.

in Gedanken die Bewegung schon in der Außenwelt in viele kleine Elementarbewegungen aufsplittert (die, wenn sie nur klein genug sind, zu statischen Zuständen werden) und diese dann wieder zu einer nun rein subjektiv wahrgenommenen Bewegung integriert, oder ob man die Bewegung in der Außenwelt noch als objektiv bestehend gelten läßt und sie erst durch die Netzhautstruktur aufgesplittert denkt: das Resultat der atomisierenden Erklärung bleibt dasselbe: Was wir als Bewegung optisch wahrnehmen, ist eine Illusion.

Der eben geschilderte Gedankengang enthält einen Trugschluß: Man macht zuerst keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Scheinbewegung und wirklicher Bewegung und beweist dann schließlich: «Scheinbewegung = optische Täuschung». Der reale unmittelbare Bewegungseindruck aber fällt aus der Gleichung heraus³, denn er ist noch etwas anderes als der atomistische Vorgang, der in der Netzhaut sich von Zelle zu Zelle abspielen soll, und dessen Vorhandensein wir aus unseren histologischen Kenntnissen nur theoretisch vermuten können. Deshalb geht das Bewegungssehvermögen — wie *Basler* (S. 322) zeigte — auch nicht-parallel mit dem Bau der Retina in den verschiedenen Bezirken.

Auch *Ehrenstein* macht in neuester Zeit — allerdings aus ganz anderen Voraussetzungen heraus — darauf aufmerksam, daß der Bewegungseindruck als ganzheitliches Phänomen und nicht «atomistisch» anzusehen sei.

Aber noch aus einem ganz anderen Grunde kann das Bewegungssehen nicht atomistisch erklärt werden: es klebt nämlich gar nicht untrennbar am gesehenen Gegenstand; wohl ist es meist mit diesem verknüpft, kann aber — so paradox dies klingen mag — auch von ihm getrennt auftreten.

Es war wiederum *Exner*, der dieses Phänomen zuerst entdeckte. Er beschrieb einen leicht nachkontrollierbaren Versuch über das Bewegungssehen an der Peripherie des Gesichtsfeldes, wobei er über seine Beobachtungen folgendes bemerkte:

«Es klingt fast komisch, daß man nur die Bewegung, nichts Bewegtes sehen soll, doch kann ich den Eindruck, den ich habe, nicht anders beschreiben.»

³ Ähnliche Einwände gelten übrigens für viele atomistische Erklärungsversuche auf dem Gebiete der Physiologie und Psychologie. Das «Atomisieren» liegt in der Natur unseres Bewußtseins, und weil wir zunächst nicht kontinuierlich vorstellen können, verlegen wir die Zersplitterung in die Außenwelt.

Einen ganz anderen, von *Schumann* mitgeteilten Versuch, aber mit ähnlichem Resultat, beschrieb auch *Lasersohn* (S. 101). Das Gemeinsame der beiden Beobachtungen ist, daß beide Male eine Bewegungsempfindung auftritt, die deutlich losgelöst ist von der — sonst meist mit ihr verknüpften — gegenständlichen Wahrnehmung.

Auch bei den eigenen Versuchsreihen berichteten die Versuchspersonen mehrmals spontan über entsprechende Beobachtungen (s. S. 35, S. 36 f., S. 38 f.).

Es scheint aber auch das Gegenteil des eben Geschilderten auftreten zu können: Das Bewegungssehen kann unter Umständen bei Hirnerkrankungen isoliert ausfallen (*Hofmann*, S. 574), wie bei dem von *Pötl* und *Redlich* beschriebenen Fall von bilateraler Affektion beider Okzipitallappen. Dort war das gegenständliche Sehen erhalten geblieben, während das Bewegungssehen fehlte.

Diese Beispiele sollen lediglich illustrieren, daß das Bewegungssehen prinzipiell verschieden ist vom gegenständlichen Sehen. Auch die Beobachtung von Tieren bestätigt dies, wie *Exner* anlässlich sehr schöner Untersuchungen über den Bau des Facettenauges der Insekten bemerkt, worin er ausführt, wie das Facettenauge ebenso unzweckmäßig zur flächenhaften und räumlichen Auffassung der Außenwelt konstruiert sei, als zweckmäßig zur Erkennung von Bewegungen.

Für das Tierleben hat das Bewegungssehen allgemein große Bedeutung; Untersuchungen der vergleichenden Physiologie (*Buddenbrook*) weisen sogar auf ganz verschiedene Hirnlokalisation für Formen- (= Gegenstands-) und Bewegungssehen.

Es ist sicher, daß das eigentliche Bewegungssehen nicht eine Funktion der Netzhaut sein kann. Es wäre nun ebenso schwierig als interessant, zu untersuchen, welche Rolle dabei der mit jedem Bewegungssehen auftretende Bewegungsimpuls spielt, den das Auge erhält, um der Bewegung eines wahrgenommenen Objektes zu folgen. Daß diese Rolle nicht klein sein kann, lehren schon einfache Beobachtungen.

Es ist bekannt, daß eine Bewegung viel schneller zu sein scheint, wenn ein vor dem bewegten Gegenstand befindlicher fester Punkt fixiert wird; zugleich braucht es eine ziemliche Selbstbeherrschung, der Bewegung nicht doch mit dem Blick zu folgen: dem inneren Bewegungsimpuls, dem das Auge folgen will, wird ein starker bewußter Widerstand gesetzt, durch den jener seinerseits vielleicht wieder verstärkt wird. Wenn dagegen keine feststehenden Gegenstände gleichzeitig sichtbar sind, drängt eine stattfindende Bewegung sich dem Auge viel weniger auf, wird eventuell gar nicht bemerkt, so daß über den Bewegungszustand eines leuchtenden Objektes im Dunkeln oft nichts ausgesagt werden kann, wenn die Geschwindigkeit unter einer ge-

wissen (relativ hochliegenden) Schwelle bleibt (*Fleischl, Aubert, S. 460 ff.*). Ebenso werden uns unwillkürliche Augenbewegungen im Dunkeln nicht bewußt, da wir durch den Mangel an Sehobjekten keinen Widerstand gegen solche Bewegungen entwickeln können.

Im Zusammenhang mit diesem Problem dürfte auch die bekannte Tatsache stehen, daß Bewegungen besonders im indirekten Sehen sehr leicht bemerkt (jedoch nicht beobachtet) werden (*Exner*), denn der Impuls der Blickwendung ist naturgemäß viel größer, wenn er durch peripher gesehene Objekte veranlaßt ist, als bei angenähert zentral gesehenen.

Aus dem Vorstehenden geht also die Wesensverschiedenheit von Bewegungssehen und Gegenstandssehen hervor. Bei unseren Schwellenbestimmungen sollte nun *der reine Bewegungseindruck* und *nicht nur das bewegt gesehene Objekt* berücksichtigt werden, was für die Versuche bei Helladaptation praktisch von geringerer Wichtigkeit war, bei Dunkeladaptation hingegen einen merklichen Unterschied bedeutete, da eben hier wieder das Phänomen des Bewegungseindruckes in Unabhängigkeit vom figürlichen Eindruck auftrat.

Zusammenfassung.

Während der Verdunklung in der Kriegszeit ist aufgefallen, daß beim Aussteigen aus einem bewegten Fahrzeug ein Urteil darüber, ob dieses schon stillsteht oder nicht, schwierig ist. Die Untersuchungen an einem Kymographion mit variabler Geschwindigkeit bei Hell- und Dunkeladaptation und der Verwendung vertikaler schwarz-weißer Streifen von 1,0 und 0,5 cm Breite sowie mit unregelmäßig gestalteten Mustern ergaben eindeutig eine durchschnittliche Erhöhung der Schwelle bei Helladaptation und Dunkeladaptation von rund 1 : 3 bis 1 : 4. Die Beurteilung bei Dunkeladaptation war überdies wesentlich schwieriger, was sich auch in der größeren Streuung der Einzelwerte zu erkennen gab.

Summary.

During the war it was noticed that on alighting from a vehicle in the dark, it was difficult to judge whether this was still moving or stationary. The investigation on a Kymographion with a variable rapiditiy in light and dark adaptation and the use of vertical black and white strips of 1.0 and 0.5 cm. width as well as with irregular patterns, showed without doubt an average increase of the threshold in light and dark adaptation of ca. 1 : 3 to 1 : 4. The test of adaptation to dark was more difficult to judge as was seen in the wider range of single values.

Résumé.

L'expérience de l'obscurcissement pendant la guerre a montré qu'il est difficile de se rendre compte, en sortant d'un véhicule, s'il est déjà arrêté ou encore en mouvement. Les recherches entreprises prouvent qu'on peut élever de 1 : 3 à 1 : 4 le seuil moyen d'adaptation à la lumière et à l'obscurité en employant un kymographe à vitesse variable strié verticalement de noir et de blanc en bandes de 1,0 et 0,5 cm. ainsi que de dessins de formes irrégulières. L'appréciation au cours de l'adaptation à l'obscurité est, de plus, passablement plus difficile, ce qui se marque à la plus grande dispersion des résultats individuels.

Literatur.

- Aubert, H. Pflügers Arch. Bd. 39, (1886), S. 359 und Bd. 40 (1887), S. 460 bis 623. — Basler, A. Pflügers Arch. Bd. 124 (1908), S. 313 ff; Netzhautfunktionen, Hdb. d. biolog. Arbeitsmethoden, Abt. V, Teil 6, Heft 3, S. 426. — Brücke, E. Th. v., s. Cords u. v. Brücke. — Brückner, A. Physiologische und psychologische Optik, Übersichtsreferate Ophthalmologica 100 und 107/108; Zur Kenntnis des sog. Bewegungsnachbildes. Schw. med. Wschr. 1947, S. 77. — Buddenbrook, W. v. Grundriß der vergl. Physiol. Berlin 1928, S. 271. — Carr, H. Cit. nach Hofmann. — Charpentier, cit. nach Aubert. — Christian, P., cit. nach Brückner. — Cords u. E. Th. v. Brücke. Geschwindigkeit des Bewegungsnachbildes, Pflügers Archiv 109, S. 54, 1907. — Ehrenstein, W. Beitr. zur ganzheitspsychologischen Wahrnehmungslehre. Leipzig 1942. Ref. Zbl. 48, 435. — Exner, S. Wiener akad. Sitzungsber. LXXII III, 1875, S. 159 ff. Fleischl, E. v. Sitzungsber. Wien. Akad., Bd. 86, III. Abt. (1882), Heft 1, S. 17. — Goethe, J. W. v. Über das Urphänomen. S. Aphorismen, Naturw. Schr. Bd. 1, S. 93. Ges.-ausgabe Insel-Verlag Leipzig. — Goldstein und Gelb, cit. nach Hofmann, S. 92. Helmholtz, H. v. Die Lehre von den Gesichtsempfindungen; Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen. Hdb. der physiolog. Optik Bd. 2 bzw. Bd. 3, Hamburg u. Leipzig, 1911 bzw. 1910. — Hofmann, F. B. Physiolog. Optik, Hdb. der ges. Augenheilk. Graefe-Saemisch Bd. 3, 1925, S. 92 und S. 547 ff. — Kleint, H. Cit. nach Brückner. — Lasersohn, W. Ztschr. f. Psych. Bd. 61, 1912, S. 81 u. S. 101. — Laurens, H. Ztschr. Sinnesphysiol. Bd. 48, 1914, S. 233. Linke, P. Stroboskopische Täuschungen und das Problem des Sehens von Bewegungen, cit. nach Lasersohn. — Matthey, G. Graefes Arch. 129, 1933, S. 290. — Pötzl u. Redlich. Wien. klin. Wschr. 1911, S. 517. — Stern, L. W. Die Wahrnehmung von Bewegungen mittels des Auges, cit. nach Lasersohn. — Stigler, Rob. Vergleich der Wahrnehmungsfähigkeit für kleinste Bewegungen in der Peripherie des Gesichtsfeldes bei Weißen und bei Negern. Ref. Zbl. 46, 610. — Szily, v. Cit. n. Cords und v. Brücke. — Wallach, H. Die Konstanz der optischen Geschwindigkeit. Ref. Zbl. 45, 407. — Wertheimer, M. Ztschr. Psychol. 61, 1912, S. 161.